

生体とデバイスの感度の違いを利用した映像の盗撮防止方式

山田 隆行† 合志 清一‡ 越前 功†¶

† 総合研究大学院大学 複合科学研究科 情報学専攻

‡ シャープ株式会社 ディスプレイシステム研究所

¶ 国立情報学研究所 コンテンツ科学研究系

概要 スクリーンやモニタに表示した映像をデジタルビデオカメラで違法に撮影する盗撮行為を防止する方式を提案する. 従来方式に電子透かしを用いた盗撮抑止方式がある. これは映像に透かしとして固有の情報を埋め込み, 盗撮された映像から透かしを検出することにより, 盗撮が行われた映画館や時間を特定する手法である[1-4]. 従来方式は, 不正者による盗撮行為を心理的に抑止する効果はあるが, 盗撮行為自体を防止できない. 本論文は, 生体とデバイスの分光感度特性の違いに着目し, 人の視覚には影響を与えずに撮影映像にノイズを重畳する光源を映像表示装置に組み込むことで, 既存のデジタルビデオカメラに新たな機能を追加することなく盗撮を防止する方式を提案する. 提案方式を映画用 100 インチスクリーンに組み込んだ盗撮防止システムを開発し, 評価実験により提案方式の有効性を確認した.

Re-shooting prevention based on difference between sensory perceptions of humans and devices

Takayuki Yamada† Seiichi Gohshi‡ Isao Echizen†¶

† Graduate University for Advanced Studies

‡ Sharp.Ltd., Display Systems Laboratories

¶ National Institute of Informatics

Abstract We propose a countermeasure to stop re-shooting pictures and videos displayed on the screens and displays through digital cameras. Conventional measures using digital watermark embed content ID into pictures and videos so that one can identify place and time where content is re-shot. Conventional method, however, cannot control re-shooting by digital cameras. The proposed measure can stop re-shooting by destroying shot content using invisible signals which add noise to content shot through CCD/CMOS devices. Testing of a prototype system implemented in 100-inch screen demonstrated the validity of the proposed measure.

1. はじめに

ネットワークのブロードバンド化, AV(オーディオ・ビジュアル)デジタル化, DVDなどの可搬媒体の大容量化に伴い, 個人が撮影した映像を高品質のままインターネット上で配信することが容易になった.

一方で, 映像の不正な取得・配信もまた容易であり, 映画館で盗撮された映画が海賊版として露店で販売される事案や, 映像配信サイトで公開される事案が発生しており, 著作権者に甚大な損害を与えている[5, 6]. 映画の盗撮対策として, 法制度面では,

映画の盗撮の防止に関する法律[5]が制定され、技術面では、電子透かしを用いた盗撮抑止方式が提案されているが、いずれも盗撮行為を直接的に防止することができない。そこで、生体とデバイスの分光感度特性の違いを利用することで既存のビデオカメラに新たな機能を追加することなくスクリーンやモニタに表示した映像の盗撮を防止する方式を提案する。

2. 映画の盗撮問題

2.1 背景

映画の盗撮は、映画館で観客が撮影機材を使ってスクリーンに表示された映画を撮影することで実現される。米映画協会(MPAA)は、映画の海賊版によってエンタテインメント業界が年間 30 億ドルの損害を被っていると推定している[6]。また、MPAA の海外管轄団体であるモーション・ピクチャー・アソシエーション(MPA)の試算によると、日本国内の映画館の盗撮で流出した海賊版による国内損害額は、邦画と洋画を合わせて 2005 年は 180 億円であったという。さらに海賊版の流通により映画館の観客数やビデオソフトの販売・レンタルの売上げが減少し映画業界は多大な損害を受けている。

2.2 従来対策

2.2.1 法律による対策

映画の録画・録音に関しては、2007 年 8 月 30 日に私的使用目的でも違法とする映画の盗撮に関する法律が制定された。この法律には盗撮防止のための努力規定(第三条)が設けられており、「映画館等において映画の上映を主催する者その他映画産業の関係事業者は、映画の盗撮を防止するための措置を講ずるよう努めなければならない」とある。これは、法律による対策の限界を示すもので、盗撮を防止するための具体的な対策を求めているものと解釈できる。

2.2.2 技術的対策

コンテンツの不正流通を防止する技術の代表的なものに暗号があるが、復号化を経てスクリーンやモニタに表示された映像に対して、秘匿性を維持

することはできない[3]。従って、暗号は盗撮への対策とならない。

これまでスクリーンやモニタに表示された映像の盗撮を抑止するために、電子透かしを用いた方式が提案されている[1-4]。これは映像や音声に電子透かしにより固有の情報を埋め込み、盗撮された映像や音声から透かしを検出することにより、盗撮が行われた映画館や時間を特定することを目的としている。文献[1-3]は、映画館 ID 等の情報を映像に埋め込むことで、スクリーンやモニタに表示された映像をビデオカメラで撮影しても撮影映像から埋め込んだ情報を検出可能な電子透かし方式を提案している。文献[4]は、映画館内に配置した複数のスピーカーから出力する個々の音源に異なる情報を埋め込み、館内のビデオカメラにより録音された音声データの電子透かし強度を評価することで、盗撮された位置を推定する方式を提案している。しかし、電子透かしを用いた従来方式では、不正者による盗撮行為を心理的に抑止する効果はあるが、デジタルビデオカメラなどの撮影機器による盗撮行為自体を防止できない。¹ また、流通したコンテンツから盗撮された映画館、撮影時間、撮影位置が検出できても、映画館に相応の設備(監視カメラシステムなど)がなければ、盗撮者の特定は困難である。

そこで本論文では、撮影機器に新たな機能を追加することなく、スクリーンやモニタに表示した映像の盗撮を防止する方式を提案する。

3. 生体とデバイスの違いを利用した映像の盗撮防止方式

3.1 原理

本論文で提案する盗撮防止方式は生体とデバイスの感度特性の違いを利用する。図 1 は、生体とデバイスによる感知可能な領域を表した概念図である。

¹ 従来方式で盗撮行為を防止するためには、撮影機器に電子透かしの検出器と記録制御器からなる盗撮防止機能を組み込むことが必要になるが、市場に流通している全ての撮影機器に当該機能を組み込むことが前提となるため、従来方式による盗撮防止は現実的に不可能である

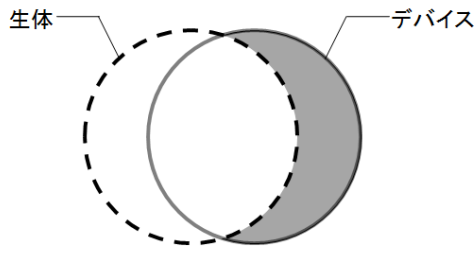


図1 生体とデバイスによる感知領域の概念図

領域の例として、人間の目と CCD デバイスの受光波長域が挙げられる。一般的な CCD や CMOS などのイメージセンサや、マイクロフォンなどのデバイスは、人間の視覚や聴覚特性に合わせて設計されるが、デバイスの特性上、完全に一致させることは不可能なため、図中の 2 つの領域に差異が生じる。本論文では、図中の影を付けた部分の領域に反応するノイズ信号を生成することで、コンテンツの通常の視聴には影響を与えずに、盗撮したコンテンツの品質を劣化させる方式を提案する。具体的には、生体の目とデジタルビデオカメラのイメージセンサの分光感度特性の違いに着目し、人の視覚には影響を与えずに撮影映像にのみノイズを重畳する光源(ノイズ光源)を映像表示装置に組み込むことで、撮影装置による盗撮を防止する方式を提案する。

3.2 提案方式

3.2.1 概要

光に関する標準仕様を勧告する国際照明委員 (International Commission on Illumination) の視覚の分光感度特性(等色関数)の可視域にもとづき、本稿では生体の目の可視域を 380~780nm とした [7]。一方、デジタルビデオカメラに用いられるイメージセンサは感度維持のため(暗闇での感度維持や鮮明化など)に可視域よりも広い領域(約 200nm~1100nm)に感度を有している。このとき、光源 $s(\lambda)$ に対する目の三刺激値 B_H, G_H, R_H とデジタルビデオカメラの三応答 B_D, G_D, R_D は、 $s(\lambda)$ を光源の放射分光分布、 $\bar{b}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{r}(\lambda)$ を等色関数、 $b(\lambda), g(\lambda), r(\lambda)$ をイメージセンサの分光感度と各種フィルタの分光透過率を合わせた分光積とすると、目の三刺激値とデジタルビデオカメラの三応答は、それぞれ次のように

表せる[7-9]。

目の三刺激値

$$\begin{aligned} B_H &= \int_{380}^{780} s(\lambda) \cdot \bar{b}(\lambda) d\lambda \\ G_H &= \int_{380}^{780} s(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ R_H &= \int_{380}^{780} s(\lambda) \cdot \bar{r}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1)$$

デジタルビデオカメラの三応答

$$\begin{aligned} B_D &= \int_{200}^{1100} s(\lambda) \cdot b(\lambda) d\lambda \\ G_D &= \int_{200}^{1100} s(\lambda) \cdot g(\lambda) d\lambda \\ R_D &= \int_{200}^{1100} s(\lambda) \cdot r(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

スクリーン・モニタに表示したい映像の光源を $v(\lambda, t)$ 、ノイズ光源を $n(\lambda, t)$ とすると、提案方式による光源 $s(\lambda, t)$ は、

$$s(\lambda, t) = v(\lambda, t) + n(\lambda, t) \quad (3)$$

と表せる。提案方式の光源 $s(\lambda, t)$ が満たす性質は、3.1 節より、次式で表される。

$$X_H[s(\lambda, t)] = X_H[v(\lambda, t)] \quad (4)$$

$$X_D[s(\lambda, t)] \neq X_D[v(\lambda, t)] \quad (5)$$

ただし、 X は R, G, B のいずれかを表す。すなわち、視覚上では、光源 $s(\lambda, t)$ と映像光源 $v(\lambda, t)$ は一致するが、イメージセンサ上では不一致となる。不一致の度合いを $\Delta = |X_D[s(\lambda, t)] - X_D[v(\lambda, t)]|$ で表すと、式(2)の線形性より、 $\Delta = |X_D[n(\lambda, t)]|$ となる。次節ではこの差分 Δ を大きくするために、ノイズ光源 $n(\lambda, t)$ の波長特性と時間特性の検討を行う。

3.2.2 ノイズ光源の波長特性

提案方式を実現するために可視域外の波長を用いる。可視域外には短波長側にある紫外線(Ultra Violet)と長波長側にある赤外線(Infrared)があるが、紫外線に長時間さらされると、皮膚、目、免疫系への疾患を引き起こす可能性があるため、生体への安全性を考慮すると紫外線をノイズ光源として使用するのは望ましくない。一方、長波長側にある赤外線は、現在の日常生活に深く浸透し、テレビのリモコン、暖房器具など様々な用途に利用されており、その安全性も確立されている。赤外光源として、赤外 LED(Light Emitting Diode)、半導体レーザー、キ

セノンランプ、ハロゲンランプなどがあるが、放射角、発光による発熱などを考慮して、本稿では赤外 LED を採用することにした。赤外 LED はレーザのような単波長光源ではなく、スペクトルに幅を持つ正規分布状の光源となる。このため、ピーク波長が可視域に近すぎると、人間の目に知覚される恐れがある。逆に、ピーク波長が可視域から離れすぎると、デジタルビデオカメラの長波長域での感度が低下することにより、ノイズ効果が減少する。そこで、780nm 以上のピーク波長を持つ 5 種類の赤外 LED(780, 810, 850, 870, 940nm)を用いて、裸眼による放射強度の評価と2種類のビデオカメラによるノイズ効果の評価を行った。この結果、ピーク波長 870nm の LED が裸眼による視覚的劣化が少なく、ビデオカメラによるノイズ効果が高いことを確認した。ピーク波長 870nm の赤外 LED について、横軸を波長、縦軸を放射強度の最大値を1とする相対分光放射強度とした相対分光放射強度分布を図 2 の点線で示す。可視域の上限 780nm 付近に僅かに放射を持つため視覚に影響を及ぼす。この部分の影響を抑えるため、カットオン波長(透過率 50%の波長)870nm をもつ短波長カットフィルタを使用する。この短波長カットフィルタを赤外 LED の前面に付け図 2 の実線で示すような分光放射強度分布にすることにより、目に知覚される赤外 LED の可視域をカットし、デジタルビデオカメラに反応する赤外成分だけを残すことができる。

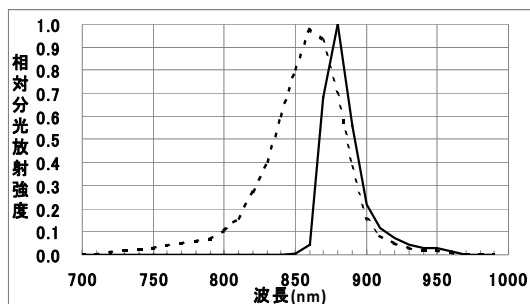


図 2 短波長カットフィルタがない場合と付けた場合の赤外 LED(波長 870nm)相対放射強度分布

上記検討より、提案方式は視覚に影響を与えることなくデジタルビデオカメラに対する妨害効果をもた

せるために、ピーク波長 870nm の赤外 LED にカットオン波長 870nm の短波長カットフィルタを赤外 LED の前面に付けた赤外 LED をノイズ光源として用いることとした。

3.3 ノイズ光源の時間特性

ノイズ光源の時間変化によるノイズ効果を検討する。生体の目の視覚特性により光源が断続呈示(点滅)の場合には、Bartley 効果により 10Hz 前後の場合に最も強い感覚を生じる。また、点滅周波数が十分高い場合には、点滅光のみかけの明るさが点滅光の平均輝度になるという Talbot の法則が成立し、人の目の時間分解能は約 50ms~100ms 程度であることから、この時間よりも短い光の点滅は連続点灯しているように知覚される[7]。

上記検討より、提案方式では、10Hz 前後で光源を点滅することにより、ノイズ光源のみかけの明るさを強く知覚させ妨害効果を上げることができると考えられる。

4. 盗撮防止システムの実装

4.1 概要

3章で提案した方式を映画用 100 インチスクリーンに組み込んだ盗撮防止システムを開発した。図 3 に点滅調整回路と赤外発光部から成る提案システム構成図を示す。

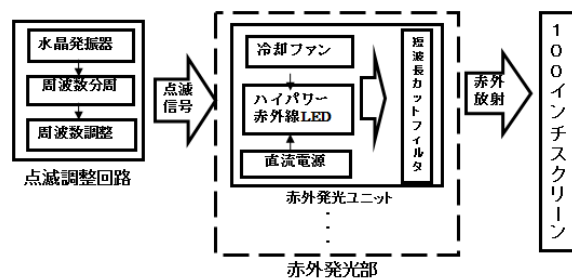


図 3 提案システム構成図

4.2 システム構成

4.2.1 点滅調整回路

点滅調整回路は、水晶発振器のパルスを分周器に通し 1~64Hz の点滅周波数を生成する。この点滅信号を使用して赤外発光ユニット内の赤外 LED の点滅を行う。

4.2.2 赤外発光部

赤外発光部は、赤外発光ユニットを縦横 3 個ずつ等間隔に配置した合計 9 個から構成される。赤外発光ユニットは、18 個の赤外 LED から成り、前面に短波長カットフィルタ、後面に冷却ファンを付けている。赤外発光ユニット 1 個は点灯中に約 36W の電力を消費する。点滅調整回路は、赤外発光ユニットの点滅周波数を調整する。盗撮防止システムは、赤外発光部を 100 インチのスクリーン中央部背面に取り付けたものである。映画用スクリーンには、音響と映像を一体化させるために、スクリーンに直径 1-2mm の無数の孔(ホール)が開いている。赤外線は可視光に比べ透過性が高いため、赤外発光部によりスクリーン背面からスクリーン表面(観客席側)に照射された赤外線は、ホールを通過するだけではなく、スクリーンを透過する。

5. 評価実験

4 章で実装した盗撮防止システムを用いて、デジタルビデオカメラおよびカメラ付き携帯電話で撮影した場合の妨害度合を主観評価により評価した。

5.1.1 評価方法

主観評価用の標準画像[10]から異なる 3 種類のサンプル映像を選び、当該映像を通常の盗撮防止機能を持たないスクリーン(従来スクリーン)と 4 章で実装した盗撮防止機能を持つスクリーン(提案スクリーン)に投影し、(a) 投影映像を評価者が直接見た場合、(b) デジタルビデオカメラで撮影した投影映像を評価者が見た場合について、従来スクリーンに対する提案スクリーンの画質の妨害度合を ITU-R BT.500 で規定された二重刺激法により評価した。二重刺激法の概要は下記の通りである。

Step1. 評価者に従来スクリーンの投影映像を提示した後、提案スクリーンの投影映像を提示。

Step2. 従来スクリーンの投影映像に対する、提案スクリーンの投影映像の妨害の度合を下記の 5 段階評価値尺度により評価する。

[評点5] 妨害がわからない

[評点4] 妨害がわかるが気にならない

[評点3] 妨害が気になるが邪魔にならない

[評点2] 妨害が邪魔になる

[評点1] 妨害が非常に邪魔になる

Step3. 上の Step1 と Step2 を(a), (b)の場合について 10 人の評価者に対して行い、10 人の評価者の評点の平均値を評価値とする。

提案スクリーンに対しては、上記の評価を 5 種類の異なる点滅周波数(全点灯, 5,10,15,20Hz)で評価した。表 1 に評価環境を示す。

表1 評価環境

スクリーン	100インチ映画用ホワイトサウンドスクリーン
プロジェクタ	デジタルプロジェクタ(1000ANSルーメン)
投影映像	(財)NHKエンジニアリングサービス システム評価用標準画像(3サンプル) フラミンゴ[Flamingoes] 走る自動車[Driving] 垂直ロール[View of Sky with credits]
	CMOSビデオカメラ(1/3.2型CMOS, 有効画素: 207万画素)
	CCDビデオカメラ(1/6型CCD, 有効画素: 69万画素)
	カメラ付き携帯電話(CMOS, 有効画素: 8万画素)
点滅周波数	・全点灯 ・4種類の点滅周波数(5, 10, 15, 20Hz)
被験者	非専門家10名(矯正視力0.7以上)

5.1.2 評価結果

図 4 にカメラ毎の評価結果を示す。図中のグラフは点滅周波数に対する評価値であり、全点灯の場合の点滅周波数は 0Hz と表記し、各マーカー ●, ▲, × はそれぞれサンプル映像の”フラミンゴ”, ”走る自動車”, ”垂直ロール”の映像の評価値である。また、図中の画像は”フラミンゴ”を録画したものである。以下に評価結果の詳細を述べる。

(a) 評価者が投影映像を直接見た場合

本ケースは、観客がスクリーンに投影された映像を観賞する場合を想定しており、ノイズ光源が知覚されないことが望ましい。主観評価の結果、評価した全てのサンプル映像において、評価者 10 人の評点は 5 であり、ノイズ光源は知覚されなかった。

(b) ビデオカメラにて録画した投影映像を評価者が見た場合

2 種類のデジタルビデオカメラ(CMOS カメラ, CCD カメラ)と 1 種類の CMOS カメラ付き携帯電話により撮影した映像の妨害度合を評価した。評価の結果、使用した全てのカメラにおいて、提案システ

ムのノイズ光源が妨害として知覚された。また、ノイズ信号の点滅により、妨害度合が向上することが判明した。以下にカメラ毎の評価結果を述べる。

(ア) CMOS ビデオカメラ

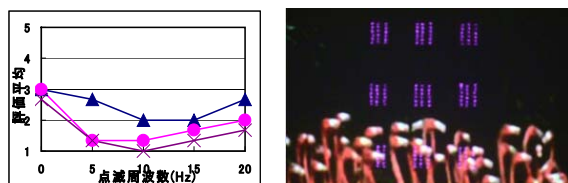
すべてのサンプル映像で評価値が最も高いのは全点灯の場合であり、点滅効果が有効であることを示した。点滅周波数 10Hz において各サンプルとも最も評価値が低く、評価値は1から2の値をとった。これは Bartley 効果によるものと考えられる。

(イ) CCD ビデオカメラ

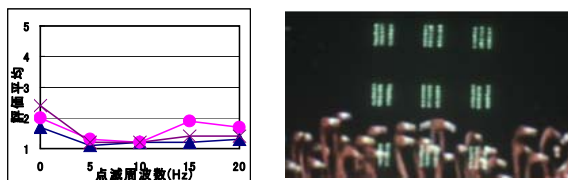
(ア)と同様に、すべてのサンプル映像で評価値が最も高いのは全点灯の場合であり、それ以外の全ての評価点で、評価値は1から2の値であった。特に点滅周波数 5Hz および 10Hz において評価値が低く、(ア)と同様に Bartley 効果によるものと考えられる。

(ウ) CMOS カメラ付き携帯電話

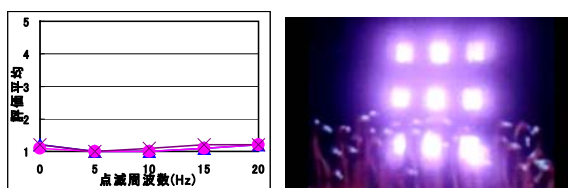
3種類の中で妨害度合が最も高かった。評価値はほぼ1で、妨害が非常に邪魔になることを示している。携帯電話のカメラは一般的にコストカットや軽量化により赤外カットフィルタが付けられておらず、高い妨害効果が得られたと考えられる。



CMOS デジタルビデオカメラ



CCD デジタルビデオカメラ



CMOS カメラ付き携帯電話

図4 妨害評価結果

6. むすび

低価格で高性能な撮影機器が入手できるようになり、今後は、映画に限らず様々な表示装置を盗撮する不正行為が増加することが予想される。提案方式は、既存の撮影装置に新たな機能を追加することなく盗撮を防止することが可能であり、今回実装した映画用スクリーン向けの盗撮防止システムだけでなく、液晶ディスプレイや LED ディスプレイなどの様々な表示装置に適用できる可能性がある。今後は、提案方式の妨害レベルの向上に加えて、様々なアプリケーションへの適用を検討する予定である。

参考文献

- [1] J. Haitsma and T. Kaler, "A Watermarking Scheme for Digital Cinema", Proc. International Conference on Image Processing, vol. 2, pp. 487-489, 2001.
- [2] 合志清一, 真島恵吾, 中村晴幸, 山田浩之, 藤井亮介, 伊藤浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷愉佳里, "再撮耐性を有する電子透かし", 放送技術, vol. 61, no. 5, pp.107-112, 2008.
- [3] 中村晴幸, 合志清一, 藤井亮介, 伊藤浩, 鈴木光義, 高井重典, 谷愉佳里, "CRT 盗撮画像に耐性を有する電子透かし", 映像情報メディア学会誌, vol. 60, no. 11, pp.1778-1788, 2006.
- [4] Y. Nakashima, R. Tachibana, and N. Babaguchi, "Watermarked Movie Soundtrack Finds the Position of the Camcorder in Theater", IEEE Trans. On Multimedia, vol. 11, no. 3, pp.443-454, 2009.
- [5] 「映画館に行こう！」実行委員会, "映画盗撮防止法 Q&A", <http://www.eiren.org/tousatuboushi.html>
- [6] MPAA(米国映画製作者連盟) 映画作品に対する著作権侵害サイト <http://www.mpa.org/piracy.asp>
- [7] 高木幹夫, 下田 陽久(編), "新編 画像ハンドブック", 東京大学出版会, 2004.
- [8] 米本和也, "CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用", CQ 出版社, 2003.
- [9] (社)カメラ映像機器工業会(CIPA), "デジタルカメラの感度規定" http://www.cipa.jp/hyoujunka/kikaku/pdf/DC-004_JP.pdf
- [10] (財)NHK エンジニアリングサービス システム評価用標準動画像, <http://www.nes.or.jp/standardimage/imagelist.html>